

فیلم‌های مرکب بر پایه نانوسلولز در بسته‌بندی مواد غذایی

عنایت‌الله نقوی^{*}

تاریخ دریافت مقاله: مهرماه ۱۳۹۳

تاریخ پذیرش مقاله: مرداد ماه ۱۳۹۴

چکیده

طی دهه اخیر، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با استفاده از بسته‌بندی‌های بر پایه مشتقات نفتی منجر به انجام پژوهش‌های گسترده جهت یافتن مواد جایگزین بر پایه پلیمرهای زیستی طبیعی شده است. پلیمرهای زیستی معمولاً دارای خواص مکانیکی ضعیف و نفوذپذیری بالا در برابر بخار آب می‌باشند. با این حال، می‌توان با استفاده از نانو موادی مانند نانوسلولز تا حد زیادی بر این معایب غلبه نمود. برخی از مزایای استفاده از نانوسلولز شامل افزایش مدت ماندگاری ماده غذایی، بهبود کیفیت محصول و عمل نمودن به عنوان حامل مواد فعال مانند آنتی‌اکسیدان‌ها و مواد ضد میکروبی می‌باشد. علاوه بر این، فیلم‌های مرکب بر پایه الیاف نانوسلولز دارای توانایی زیادی برای تهیه نانوکامپوزیت‌های ارزان قیمت، بسیار قوی و سبک وزن می‌باشند. بنابراین، هدف از این مطالعه معرفی کاربردهای بالقوه و مزایای استفاده از نانوکامپوزیت‌ها، به ویژه نانوسلولز، در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی است.

واژه‌های کلیدی

بسته‌بندی، نانوکامپوزیت، نانوسلولز، پلیمر زیستی

است و ذخیره‌سازی یا انبارداری، جابه‌جایی و سایر عملیات تجاری آن را نیز تسهیل می‌کند. بنابراین، با داشتن این نقش‌های مهم، بسته‌بندی تبدیل به سومین صنعت بزرگ در جهان شده است که حدود ۲٪ از تولید ناخالص ملی^۳ (GNP) در کشورهای توسعه یافته را شامل می‌شود [۱، ۲ و ۳]. قابل ذکر است که حدود ۵۰٪ از محصولات کشاورزی به دلیل عدم انجام بسته‌بندی از بین می‌روند. علل از بین رفتن این محصولات بسته‌بندی نشده، آب و هوای بد، فسادهای فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی^۴ می‌باشد [۱].

پیشرفت در بسته‌بندی مواد غذایی در طول چند سال آینده بسیار مهم خواهد بود؛ عمدتاً به دلیل الگوها و سبک زندگی جدید و پر مشغله مصرف‌کنندگان، ایجاد تقاضا و رشد جمعیت جهان که تخمین زده می‌شود تا سال ۲۰۲۵

۱- مقدمه

هدف از بسته‌بندی مواد غذایی، حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی موجود در آن از زمان تولید تا زمان استفاده توسط مصرف‌کننده می‌باشد و علاوه بر فراهم ساختن امکان توزیع و نگهداری مؤثر ماده غذایی، یک نقش مهم بسته‌بندی، محافظت از محصول در برابر آسیب‌های فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی^۲ است. همچنین، بسته‌بندی باید در مورد محصول و محتویات بسته اطلاعاتی در اختیار مصرف‌کننده قرار دهد. علاوه بر این، بسته‌بندی دارای یک نقش ثانویه، برای مثال، کاهش آسیب و ضایعات برای توزیع‌کننده و مصرف‌کننده

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* (نویسنده مسئول: Enayat.naghavi@gmail.com)

2- Biological damages

۳۸

3- Gross national product

4- Microbiological deteriorations

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون
بسته‌بندی

سال ششم - شماره ۲۲ - تابستان ۱۳۹۴

مونومرهای به‌دست آمده از مواد زیستی^{۱۰} تعریف می‌شود[۱] تا به امروز، بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و پروژه‌های متعددی در این زمینه انجام شده و هنوز هم در حال انجام است. یکی از دلایل مهم برای این توجه، بازیابی مواد بسته‌بندی سازگار با محیط زیست است. علاوه بر این، استفاده از مواد بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر دارای بیشترین پتانسیل در کشورهای است که در آن‌ها دفن زباله^{۱۱} ابزار اصلی مدیریت پسماند یا ضایعات^{۱۲} است. مواد بسته‌بندی زیستی، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی^{۱۳} همراه با مواد بسته‌بندی اولیه و ثانویه را شامل می‌شوند [۵]. متأسفانه، تا کنون استفاده از فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر برای بسته‌بندی مواد غذایی به شدت به دلیل خواص ممانعت‌کنندگی^{۱۴} و مکانیکی ضعیف نشان داده شده و به وسیله پلیمرهای طبیعی محدود بوده است. به همین دلیل، پلیمرهای طبیعی اغلب با دیگر پلیمرهای سنتزی^{۱۵} مخلوط می‌شوند (تهیه فیلم‌های مرکب یا کامپوزیت^{۱۶}) و در موارد کمتر نیز با هدف افزایش کاربرد آن‌ها در شرایط خاص‌تر و حادثر، به روش شیمیایی اصلاح می‌شوند [۶].

۲-۱- طبقه‌بندی پلیمرهای زیستی

تعداد زیادی از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به طور شیمیایی یا زیستی، در طول چرخه رشد همه موجودات سنتزی^{۱۷} می‌شوند. برخی از میکروارگانیسم‌ها^{۱۸} و آنزیم^{۱۹}‌های قادر به تجزیه آن‌ها شناسایی شده‌اند. شکل (۱) یک نوع طبقه‌بندی را برای پلیمرهای زیستی نشان می‌دهد[۷]:

- 10- Bio-derived monomers
- 11- Landfill
- 12- Waste management
- 13- Edible films and edible coatings
- 14- Barrier properties
- 15- Synthetic polymers
- 16- Composite films
- 17- Synthesis
- 18- Microorganisms
- 19- Enzyme

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون
بسته‌بندی

به ۱۵ میلیارد برسد. شناخته‌شده‌ترین مواد بسته‌بندی که این معیارها را برآورده می‌کنند، مواد پلاستیکی (به ویژه مواد بر پایه پلی‌اتیلن)^۱ هستند که در صنایع غذایی بیش از ۵۰ سال مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد ایمن، ارزان، متنوع و انعطاف‌پذیر هستند. با این حال، یکی از محدودیت‌ها برای استفاده از مواد پلاستیکی برای بسته‌بندی مواد غذایی، مسئله دور انداختن یا دفع آن‌ها می‌باشد که دارای قابلیت بازیافت^۲ بسیار کم هستند [۳]. اخیراً، تمام پلاستیک‌هایی که به طور گسترده در بخش‌های مختلف استفاده می‌شوند، از محصولات پتروشیمی^۳ تولید می‌شوند. با افزایش هزینه‌های نفت، نگرانی برای پیدا کردن روش‌های مقرون به صرفه برای تولید مواد بسته‌بندی به وجود می‌آید. علاوه بر مسائل زیست محیطی بالا، بسته‌بندی مواد غذایی تحت تأثیر تغییرات قابل توجه در توزیع مواد غذایی، از جمله تمایل مصرف‌کننده برای مواد غذایی تازه‌تر و راحت‌تر و همچنین میل برای مواد غذایی با کیفیت بهتر و ایمن‌تر قرار می‌گیرد. با توجه به این موارد، مصرف‌کنندگان خواهان انواعی از مواد برای بسته‌بندی محصولات غذایی هستند که طبیعی‌تر، یکبار مصرف^۴ زیست‌تخریب‌پذیر^۵ و قابل بازیافت^۶ باشند [۴].

این مقاله کاربردهای بالقوه و مزایای استفاده از نانوکامپوزیت، به ویژه نانوسلولز در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی را مورد بحث قرار می‌دهد.

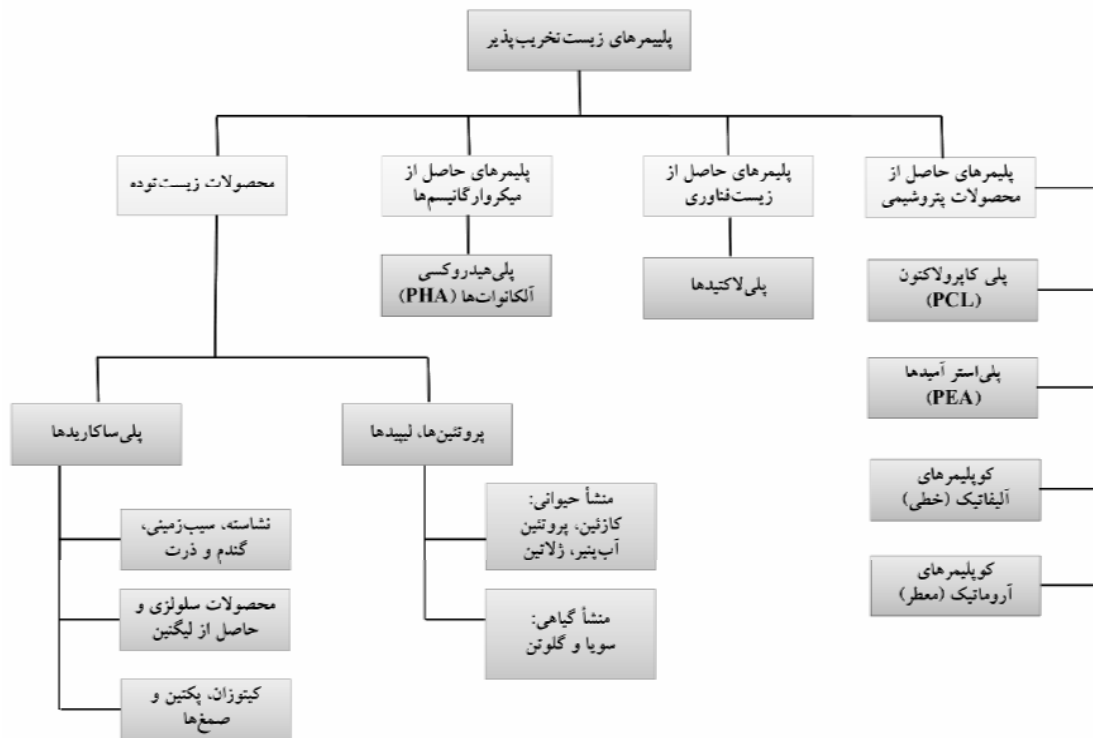
۲-۲- بسته‌بندی زیستی^۷

بسته‌بندی زیستی به عنوان بسته‌بندی حاوی مواد اولیه به‌دست آمده از منابع کشاورزی (برای مثال، تولید شده از مواد تجدیدپذیر و خام بیولوژیکی^۸ مانند نشاسته، سلولز^۹ و

- 1- Polyethylene- or copolymer-based materials
- 2- Recyclability
- 3- Petrochemical products
- 4- Disposable
- 5- Biodegradable
- 6- Recyclable
- 7- Bio-based packaging
- 8- Renewable, biological raw materials
- 9- Cellulose

به دست می‌آیند. اولین خانواده پلیمرهای کشاورزی (مثلاً، پلی ساکاریدها) توسط شکستن^{۱۰} زیست‌توده به دست می‌آیند. خانواده دوم و سوم، پلی‌استرها هستند که به ترتیب توسط تخمیر زیست توده یا از گیاهان اصلاح شده ژنتیکی^{۱۱} (برای مثال، پلی‌هیدروکسی آلکانوات) و توسط سنتز مونومرهای به دست آمده از زیست توده (مثل پلی‌لاکتیک اسید) به دست می‌آیند. خانواده چهارم، پلی‌استرها هستند که به طور کامل توسط فرآیند پتروشیمی ساخته می‌شوند (برای مثال، پلی‌کاپرولاکتون، پلی‌استر آمید، کوپلیمرهای آلیفاتیک یا معطر^{۱۲}). تعداد زیادی از این پلیمرهای زیستی به لحاظ تجاری در دسترس هستند. آن‌ها دارای خواص مختلف

(۱) پلیمرهای حاصل از توده زیستی^۱ مانند پلیمرهای کشاورزی^۲ حاصل از منابع کشاورزی؛ مانند نشاسته و سلولز؛ (۲) پلیمرهای با منبع میکروبی^۳؛ مانند پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها^۴؛ (۳) پلیمرهای سنتز شده به طور شیمیایی با استفاده از مونومرهای به دست آمده از منابع کشاورزی؛ مانند پلی‌لاکتیک اسید^۵؛ (۴) پلیمرهایی که در آن‌ها مونومرها و پلیمرها، هر دو توسط سنتز شیمیایی حاصل از منابع فسیلی به دست می‌آیند؛ مانند پلی‌کاپرولاکتون (PCL)^۶، پلی‌استر آمید^۷ و غیره. به جز خانواده چهارم که منشأ فسیلی^۸ دارد، مهم‌ترین پلیمرهای خانواده ۱-۳ از منابع تجدیدپذیر^۹ (توده زیستی)



شکل ۱- طبقه‌بندی پلیمرهای زیست تخریب پذیر [۱۲]

بوده و می‌توانند با پلیمرهای زیست تخریب‌ناپذیر در زمینه‌های مختلف صنعتی رقابت کنند [۱ و ۷].

- 1- Biomass
- 2- Agro-polymers
- 3- Microbial polymers
- 4- Polyhydroxyalkanoate
- 5- Poly(lactic acid)
- 6- Polycaprolactone
- 7- Polyester amide
- 8- Fossil origin
- 9- Renewable resources

- 10- Fractionation
- 11- Genetically modified plants
- 12- Aliphatic or aromatic copolyesters

است. دیواره‌های سلولی ثانویه گیاهان، حاوی سلولز (۸۰-۴۰٪)، همی سلولز (۴۰-۱۰٪) و لیگنین (۲۵/۵٪) است که در آن میکروفیبریل‌ها سلولزی در لیگنین جای می‌گیرند. همی سلولز نسبت به حالت خطی سلولز یک پلیمر بسیار منشعب است. ساختار آن شامل انواعی از واحدهای قندی است؛ در حالی که سلولز تنها شامل واحدهای ۱، ۴-β-D-دی-گلوکوپیرانوز^{۱۵} است و درجه پلیمریزاسیون^{۱۶} (DP) آن ۱۰-۱۰۰ برابر کمتر از سلولز است. در نهایت، لیگنین یک پلیمر هیدروکربنی^{۱۷} پیچیده است که دارای اجزای آلیفاتیک (خطی) و آروماتیک^{۱۸} می‌باشد [۱۰].

۲-۳- نانوسلولز (NC)^{۱۹}

مولکول‌های سلولز همیشه به صورت فیبریل‌های در اندازه نانو^{۲۰}، به طور زیستی سنتز می‌شوند^{۲۱} که به نوبه خود به صورت فیبر یا الیاف، فیلم، دیواره و غیره در می‌آیند. نانو الیاف سلولز، نانوسلولز (NC) نامیده می‌شوند. آرایش مولکولی این دسته‌های فیبری آن‌قدر کوچک است که قطر متوسط دسته در حدود ۱۰ نانومتر است. این نانو الیاف سلولزی دارای قطر ۵۰-۵ نانومتر و طول هزاران نانومتر می‌باشند [۱]. نانوسلولز یک مشتق سلولزی^{۲۲} تشکیل شده از یک شبکه فیبری در ابعاد نانو است که ویژگی‌های محصول و قابلیت‌های آن را تعیین می‌کند. الیاف NC، نانو مواد^{۲۳} بسیار جالب برای تولید نانوکامپوزیت^{۲۴} های ارزان، سبک وزن و بسیار قوی می‌باشند. به طور کلی، NC توسط تشکیل زیستی^{۲۵} سلولز

سلولز یکی از فراوان‌ترین پلیمرهای زیستی^۱ بر روی کره زمین است که در چوب، پنبه^۲ و سایر مواد گیاهی وجود دارد و در ساختارهای گیاهی نیز به عنوان فاز تقویت‌کننده^۳ غالب ایفای نقش می‌کند. فیبرها یا الیاف گیاهی^۴ عمدتاً از سلولز، همی سلولز^۵، لیگنین^۶ تشکیل شده‌اند. سلولز در میکروفیبریل-های^۷ احاطه شده توسط دو جزء اصلی دیگر به نام‌های همی سلولز و لیگنین آرایش یافته است [۸]. میکروفیبریل‌های سلولز می‌توانند به شکل میکروفیبریل‌های درهم تنیده^۸ در دیواره سلولی یافت شوند (با قطر ۲۰-۲ نانومتر و طول ۴۰۰۰-۱۰۰ نانومتر، بسته به منبع آن). در این میکروفیبریل‌ها، نانوالیاف‌هایی^۹ با قطر ۵۰-۵ نانومتر و طول چندین میلیمتری وجود دارند که دارای نواحی نانوکریستالی و مناطق آمورف^{۱۰} هستند [۱۴]. سلولز یک زنجیره پلیمری کربوهیدراتی خطی متشکل از واحدهای دی-گلوکوپیرانوز^{۱۱} است که توسط اتصالات بتا-۱، ۴-گلیکوزیدی^{۱۲} به یکدیگر متصل شده‌اند. در هر سلول واحد از سلولز، دو زنجیره توسط پیوند هیدروژنی^{۱۳} به یکدیگر در یک ساختار یا پیکربندی موازی با هم^{۱۴} متصل می‌شوند که سلولز نامیده می‌شود. این واحدها از هر طرف فشرده می‌شوند تا تشکیل میکروفیبریل‌های سلولز دهند که شامل نواحی نامنظم یا آمورف نیز می‌باشند. آرایش میکروفیبریل‌های سلولز در دیواره اولیه به صورت تصادفی

- 1- Biopolymers
- 2- Cotton
- 3- Reinforcing phase
- 4- Plant fibers
- 5- Hemicellulose
- 6- Lignin
- 7- Microfibrils
- 8- Intertwined microfibrils
- 9- Nanofibers
- 10- Nanocrystalline domains and amorphous regions
- 11- D-glucopyranose units
- 12- Glycosidic linkages
- 13- Hydrogen bond
- 14- Parallel conformation

- 15- Glucopyranose units
- 16- Degree of polymerization
- 17- Hydrocarbon polymer
- 18- Aliphatic and aromatic constituents
- 19- Nanocellulose
- 20- Nanosized fibrils
- 21- Biosynthesized
- 22- Cellulose derivative
- 23- Nanomaterials
- 24- Nanocomposite
- 25- Bio-formation

از طریق باکتری‌ها و نیز از تجزیه سلولزهای گیاهی با استفاده از نیروهای برشی در روش‌های خالص‌سازی تولید می‌شود [۱۱].

نانوالیاف سلولز در مقایسه با الیاف با اندازه میکرو برای تقویت پلیمرها مؤثرتر هستند که به علت برهم کنش‌های میان اجزای در ابعاد نانو^۱ است که اگر پراکندگی خوبی از نانوالیاف در ماتریس^۲ وجود داشته باشد، تشکیل یک شبکه منفذدار^۳ متصل شده توسط پیوند هیدروژنی می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود که تقویت NC در ماتریس پلیمری ممکن است مواد با ارزش افزوده^۴ فراهم نماید که دارای عملکرد بسیار بهتر و کاربردهای گسترده برای نسل بعدی مواد زیست‌تخریب‌پذیر باشد [۱۲].

فیلم‌های مرکب پلیمری^۵ مخلوطی از پلیمرهای با مواد افزودنی معدنی یا آلی هستند که دارای شکل‌های هندسی خاص (مانند الیاف، پرک^۶ و مواد ذره‌ای^۷) می‌باشند. استفاده از پُرکننده‌های در مقیاس نانو^۸ منجر به توسعه نانوکامپوزیت‌های پلیمری شده و نشان‌دهنده یک جایگزین اساسی برای کامپوزیت‌های پلیمری معمول است [۱۳]. استفاده از نانوکامپوزیت‌ها نقش‌های مهمی مانند افزایش مدت ماندگاری و کیفیت مواد غذایی را ایفا می‌کنند؛ زیرا آن‌ها نه تنها می‌توانند به عنوان موانع^۹ در برابر رطوبت، بخار آب، گازها و مواد حل‌شده^{۱۰} عمل کنند، بلکه همچنین به عنوان حامل‌های^{۱۱} برخی از مواد فعال مانند آنتی‌اکسیدان‌ها^{۱۲} و آنتی‌بیوتیک‌ها^{۱۳} به کار گرفته می‌شوند [۱۴]. نشان داده شده است که افزودن میزان نسبتاً پایین از نانوذرات (کمتر از ۰.۵٪)

به طور قابل توجهی سبب بهبود خواص پلاستیک‌های نهایی می‌شود و قابلیت تغییر شکل^{۱۴} و استحکام را افزایش داده و منجر به کاهش ضریب هدایت الکتریکی^{۱۵} و نفوذپذیری در برابر گاز^{۱۶} می‌شود [۱۵].

۳- نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها ترکیبی از پلیمرها با پرکننده‌های معدنی یا آلی در ابعاد نانو^{۱۷} با اندازه، شکل هندسی و خواص شیمی سطح^{۱۸} خاص هستند. پلیمرهای مورد استفاده معمولاً شامل هیدروکلوئیدها^{۱۹} مانند پروتئین، نشاسته، پکتین^{۲۰} و دیگر پلی‌ساکاریدها هستند. نانوذرات معدنی مختلف به عنوان مواد افزودنی برای افزایش عملکرد پلیمر شناخته شده‌اند [۷]. نانوپرکننده‌ها شامل رس جامد لایه‌ای^{۲۱}، نانوالیاف پلیمری سنتزی^{۲۲}، نانوالیاف سلولز و نانولوله‌های کربنی^{۲۳} می‌باشند. تا به حال، تنها مواد جامد غیرآلی لایه‌ای مانند سیلیکات لایه‌ای^{۲۴} (نانورس‌ها) توجه صنعت بسته‌بندی را به خود جلب کرده‌اند. این امر به دلیل در دسترس بودن آسان، هزینه پایین و سازگاری بیشتر آن‌ها با پلیمرهای زیستی می‌باشد [۱۵].

۳-۱- مزایای استفاده از نانوکامپوزیت‌ها

هنگامی که پلیمرها با پرکننده‌های نانویی ترکیب می‌شوند، نانوکامپوزیت حاصله در مقایسه با پلیمر خالص، بهبودهای قابل توجهی در خواص مکانیکی، پایداری

- 14- Deformability
- 15- Electrical conductivity
- 16- Gas permeability
- 17- Nanosized inorganic or organic fillers
- 18- Surface chemistry properties
- 19- Hydrocolloids
- 20- Pectin
- 21- Solid layered clays
- 22- Synthetic polymer nanofibers
- 23- Carbon nanotubes
- 24- Layered silicate

- 1- Nanosized elements
- 2- Matrix
- 3- Percolated network
- 4- Value-added materials
- 5- Polymer composites
- 6- Flake
- 7- Particulates
- 8- Nanoscale fillers
- 9- Barriers
- 10- Solutes
- 11- Carriers
- 12- Antioxidants
- 13- Antimicrobials

ویسکوزیته (گرانروی) مذاب^{۱۳} پلیمرهای تجدیدپذیر^{۱۴} نیز پس از تهیه نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد [۱۵].

استراهکر^{۱۵} و مانیاس (۲۰۰۰) گزارش کردند که برای یک کامپوزیت ورقه‌ای مونتوریلونیت^{۱۶} (MMT) (۵٪)، دمای نرم شدن نانوکامپوزیت‌ها تا ۲۵°C افزایش می‌یابد؛ نفوذپذیری در برابر آب تا ۶۰٪ کاهش یافته و این‌که نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند شفافیت نوری^{۱۷} خود را حفظ نمایند [۱۷]. به این دلایل، در مقایسه با کامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر معمول، از لحاظ وزن بسیار سبک‌تر هستند که آن‌ها را با مواد دیگر برای کاربردهای خاص، به‌خصوص بسته‌بندی مواد غذایی قابل رقابت می‌سازد [۱۸]. یکی دیگر از مزایای بسیاری از نانوکامپوزیت‌ها (به ویژه انواع بر پایه پلیمر زیستی) این است که می‌توانند به طور کارآمدی توسط محیط زیست تخریب شود [۱۹]. تخریب یک پلیمر ممکن است ناشی از عمل میکروب‌ها، ماکروارگانیسم‌ها^{۱۸}، تخریب نوری یا تخریب شیمیایی باشد [۱۹].

۳-۲- استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی

استفاده از مواد و روش‌های بسته‌بندی مناسب برای به حداقل رساندن تلفات مواد غذایی و ارائه محصولات غذایی ایمن، سالم و بی‌خطر همواره مورد توجه صنعت بسته‌بندی مواد غذایی بوده است. علاوه بر این، تمایل مصرف‌کنندگان برای مواد غذایی با کیفیت بهتر، محصولات مواد غذایی شبه‌تازه (موادی با خصوصیتی شبیه به ماده اولیه و کمترین تغییرات نامطلوب ممکن) و راحت^{۱۹} (از لحاظ آماده‌سازی) در طول دهه‌های اخیر

ابعادی^۱ و مقاومت در برابر حلال یا گاز حاصل می‌نمایند. به دلیل نانوذرات به دست آمده توسط دیسپرسیون^۲ یا پراکنده شدن^۳، این نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند مزایای بسیاری مانند زیست‌تخریب‌پذیری، بهبود ویژگی‌های حسی مواد غذایی مانند ظاهر، بو و طعم را ارائه دهند. همچنین، باعث افزایش مدت ماندگاری و بهبود کیفیت کالاها معمولاً بسته‌بندی نشده می‌گردند و شرایط را برای بسته‌بندی مجزا یا فردی^۴ محصولات غذایی به شکل ذرات کوچک مانند آجیل‌ها^۵ و کشمش^۶ فراهم می‌کنند.

علاوه بر این، به عنوان حامل برای عوامل ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی عمل می‌کنند و دارای ویژگی رهایش کنترل‌شده مواد فعال^۷ بوده و جزء منابع تجدیدپذیر سالانه محسوب می‌شوند [۱۶]. همچنین، نانوکامپوزیت‌ها مزایای دیگری مانند چگالی^۸ کم، شفافیت، خواص سطحی بهتر و قابلیت بازیافت را حاصل می‌کنند. افزایش بسیاری از خواص در مقیاس طولی پایه وابسته به مورفولوژی یا ریخت‌شناسی^۹ و خواص این مواد می‌باشد.

ذرات نانوپرکننده حداقل دارای یک بُعد در محدوده نانومتر (از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) هستند. این بدان معنی است که پراکندگی یکنواخت این ذرات می‌تواند منجر به مساحت بین‌سطحی^{۱۰} فوق‌العاده بزرگ بین اجزاء شود. سطح بین‌آلی^{۱۱} یا معدنی بسیار بزرگ باعث تغییر تحرک مولکولی و رفتار آرمیدگی^{۱۲}، بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت در حالت‌های جامد و ذوب شده می‌گردد و پایداری حرارتی و

- 1- Dimensional stability
- 2- Dispersions
- 3- Dispersion
- 4- Individual packaging
- 5- Nuts
- 6- Raisins
- 7- Controlled release of active ingredients
- 8- Density
- 9- Morphology
- 10- Interfacial area
- 11- Interface
- 12- Relaxation behavior

- 13- Melt viscosity
- 14- Renewable polymers
- 15- Strawhecker
- 16- Montmorillonite (MMT) exfoliated composite
- 17- Optical clarity
- 18- Macro-organisms
- 19- Fresh-like, and convenient food products

افزایش یافته است. بنابراین، انواع فناوری‌های بسته‌بندی فعال^۱ برای ارائه کیفیت بهتر، مواد غذایی سالم و بی‌خطر و همچنین، به منظور محدود کردن مشکلات مربوط به آلودگی محیط زیست ناشی از مواد بسته‌بندی و مسئله دفع و تخریب آن‌ها توسعه یافته‌اند[۱].

استفاده از نانوکامپوزیت‌ها ممکن است یک امکان جدید برای حل این مشکلات فراهم نماید. مواد بسته‌بندی نانوکامپوزیت، دارای پتانسیل زیادی برای افزایش کیفیت، ایمنی و پایداری مواد غذایی به عنوان یک فناوری بسته‌بندی و فرآوری جدید یا نوآورانه^۲ می‌باشند. مزیت منحصر به فرد بسته‌بندی پلیمرهای زیستی طبیعی ممکن است به توسعه محصول جدید در صنایع غذایی، مانند بسته‌بندی مجزا یا فردی مواد غذایی حاوی ذرات جامد^۳، حامل‌ها برای مواد فعال از لحاظ عملکرد^۴ و مکمل‌های غذایی^۵ منجر شود (شکل ۲) [۲۰].



شکل ۲- نمونه‌ای از بسته‌بندی مواد غذایی با استفاده

از فیلم‌های نانویی

۴- انواع نانوسلولز

همان‌طور که در بالا شرح داده شد، یک نوع NC به‌طور مستقیم از طریق سنتز زیستی^۶ توسط باکتری‌های خاص تشکیل می‌شود که این نوع نانوسلولز، NC باکتریایی نامیده می‌شود. نوع دیگری از NC را می‌توان از منبع چوب با استفاده از مراحل تجزیه مکانیکی کنترل شده^۷ برای تولید ویژگی‌های محصول مورد نظر تهیه نمود [۲۱].

۴-۱- نانوسلولز حاصل از باکتری‌ها

در سال ۱۸۸۶، فردی به نام براون^۸ سلولز باکتریایی^۹ (BC) را به عنوان یک محصول سنتز زیستی حاصل از گونه گلوکونواستوباکتر گزیلینوس^{۱۰} کشف نمود [۲۲]. او یک توده ژلاتینی^{۱۱} تشکیل شده روی محلول حین تخمیر سرکه^{۱۲} را به عنوان سلولز شناسایی کرد. لازم به ذکر است که در اواسط قرن بیستم، یک محیط کشت^{۱۳} ویژه برای گلوکونواستوباکتر گزیلینوس برای بهینه‌سازی تشکیل سلولز در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد. به عنوان یک نتیجه حاصل از پژوهش‌های سیستماتیک^{۱۴} و جامع انجام شده در طول دهه گذشته، آگاهی وسیعی در ارتباط با تشکیل و ساختار سلولز باکتریایی کسب شده است. این کار بخش مهمی از یکپارچه‌سازی یا ادغام^{۱۵} روش‌های بیوتکنولوژیکی یا زیست‌فناوری^{۱۶} با شیمی پلی‌ساکارید^{۱۷}

- 6- Biosynthesis
- 7- Controlled mechanical disintegration
- 8- A. J. Brown
- 9- Bacterial cellulose
- 10- Gluconacetobacter xylinus
- 11- Gelatinous mass
- 12- Vinegar fermentation
- 13- Culture medium
- 14- Systematic
- 15- Integration
- 16- Biotechnological
- 17- Polysaccharide chemistry

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون
بسته‌بندی

- 1- Active packaging technologies
- 2- Innovative packaging and processing technology
- 3- Individual packaging of particulate foods
- 4- Functionally active substances
- 5- Nutritional supplements

و توسعه محصولات سلولز با خواص جدید و کاربردهای بالقوه است [۲۳].

۴-۲- نانوسلولز حاصل از چوب

برعکس سلولز باکتریایی (BC)، سلولز حاصل از چوب متشکل از الیاف‌هایی است که حدود ۱۰۰ برابر ضخیم‌تر هستند. به دلیل کشت^۱ گران و پیچیده سلولز حاصل از چوب (محیط پیچیده و زمان کشت طولانی)، آن نیز یک چالش برای تولید سلولزهای نانوفیبریلی^۲ حاصل از چوب است. زیرساختارهای^۳ چوب تنها با تیمار شیمیایی^۴ و روش‌های تجزیه مکانیکی قابل دسترسی هستند [۲۲].

در ۲۵ سال گذشته، تلاش‌هایی برای کاهش دادن اندازه الیاف چوب وجود داشته است. به عنوان اولین گام، در اوایل دهه ۱۹۸۰، توربک^۵ و همکاران (۱۹۸۳) سلولز میکروفیبریلی (MFC)^۶ را ابداع نمودند [۲۴].

امروزه، راه‌های مختلفی برای تولید مواد با قطر فیبر یا الیاف کنترل شده وجود دارد. برخی از تحقیقات در مورد خواص NC حاصل از چوب وجود دارد که نشان می‌دهد آن دارای ظرفیت نگهداری آب^۷ شگفت‌انگیز، مشابه با سلولز باکتریایی است. الیاف NC حاصل از چوب برای سفت کردن^۸ رنگ‌های امولسیون^۹ و کمک‌فیلترها^{۱۰} برای انجام فیلتراسیون^{۱۱} مفید هستند. علاوه بر این، در کاغذسازی به عنوان یک پوشش^{۱۲} و حامل رنگ در رنگ‌زنی کاغذ استفاده می‌شود. همچنین، می‌توان آن را در صنعت مواد غذایی به عنوان یک عامل تغلیظ‌کننده^{۱۳}، یک مانع در برابر گاز^{۱۴} و در

کاغذهای لامینه شده مقاوم در برابر رطوبت^{۱۵} برای بسته‌بندی استفاده نمود [۲۵].

علاوه بر کاربرد به شکل خالص، ممکن است NC حاصل از چوب در کامپوزیت‌های پلیمری نیز استفاده شود. در آزمون‌های انجام شده، استحکام کششی این کامپوزیت‌ها یا مواد مرکب پنج برابر بیشتر از استحکام کششی پلیمرهای خالص بود [۲۶]. این نتیجه و همچنین، منشأ طبیعی آن باعث می‌شود که این NC برای ترکیب با پلیمرهای زیستی مختلف جذاب باشد. کاربردهای احتمالی برای چنین پلیمرهای زیستی تقویت شده^{۱۶} می‌تواند در زمینه‌هایی مانند پزشکی، صنایع غذایی و باغبانی به وجود آید. در این بخش‌ها، خواصی مانند زیست‌تخریب‌پذیری، مقاومت مکانیکی بالا و شفافیت نوری مورد نیاز، مهم می‌باشند [۲۷].

۵- کاربرد نانوسلولز

در سال‌های اخیر به علت خواص استثنایی پلیمرهای NC جدید، بسیاری از کاربردها مشاهده شده است. غشاها و مواد مرکب تهیه شده از سلولز و استرهای سلولز^{۱۷} زمینه‌های کاربردی مهمی در توسعه و استفاده از این مواد پلیمری می‌باشند. مهم‌ترین بخش از لحاظ حجم در فرآوری شیمیایی سلولز شامل الیاف‌های سلولزی بازسازی شده^{۱۸}، فیلم‌ها و غشاها می‌باشند. به نظر می‌رسد که غشای فرآوری شده^{۱۹} رابط مهمی به عنوان یک ماده بسته‌بندی در صنایع غذایی باشد که در آن خواص حذف مداوم رطوبت و حداقل انتقال اکسیژن، نقش حیاتی را ایفا می‌کنند. خلوص، ظرفیت آب قابل کنترل^{۲۰}، پایداری مکانیکی خوب و خواص ممانعت‌کنندگی در برابر گاز مربوط به NC باکتریایی، شاخص‌های مهمی برای این کاربرد می‌باشند [۱].

- 1- Cultivation
- 2- Nanofibrillated celluloses
- 3- Substructures
- 4- Chemical treatment
- 5- Turbak
- 6- Micro fibrillated cellulose
- 7- Water-storage capacity
- 8- Solidification
- 9- Filter aids
- 10- Filter aids
- 11- Filtration
- 12- Coating
- 13- Thickening agent
- 14- Gas-barrier

- 15- Moisture resistant paper laminate
- 16- Reinforced biopolymers
- 17- Cellulose esters
- 18- Regenerated cellulose fibers
- 19- Processed membrane
- 20- Controllable water capacity

۶- فیلم‌های مرکب بر پایه نانوسلولز

پژوهش‌های مختلفی وجود دارند که در آن‌ها از NC به عنوان یک عامل تقویت‌کننده^۱ در ماتریس پلیمر استفاده شده است. نانوکامپوزیت‌های بر پایه مواد نانوسلولزی با پلیمرهای زیست‌تخریب‌ناپذیر مشتق شده از نفت^۲ مانند پلی‌اتیلن^۳ (PE) یا پلی‌پروپیلن^۴ (PP) و همچنین، با پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مانند پلی‌لاکتیک‌اسید^۵ (PLA)، پلی‌وینیل‌الکل^۶ (PVA)، نشاسته، PCL، متیل سلولوز^۷ و کیتوزان^۸ تهیه شده‌اند.

لی^۹ و همکاران (۲۰۰۹) ساخت مواد مرکب PVOH-NC توسط تقویت NC به داخل یک ماتریس PVOH در سطوح مختلف استفاده از ماده پرکننده و ریخته‌گری^{۱۰} بعدی فیلم را گزارش کردند [۲۸]. NC با هیدرولیز اسیدی سلولز میکروکریستال ریزبلورین^{۱۱} (MCC) در غلظت‌های مختلف اسید هیدروبرومیک^{۱۲} (HBr) تهیه شد. بررسی خصوصیات شیمیایی NC برای تجزیه و تحلیل قابلیت تبلور^{۱۳} (Xc)، درجه پلیمریزاسیون^{۱۴} (DP) و وزن مولکولی^{۱۵} (Mw) انجام شد. هیدرولیز اسیدی به‌طور پیوسته DP و Mw مربوط به MCC را کاهش داد. قابلیت تبلور MCC با ۱/۵ M و ۱/۵ M HBr ۲/۵ افزایش معنی‌داری را به علت تخریب نواحی آمورف^{۱۶} در سلولز نشان داد. خواص مکانیکی و حرارتی فیلم‌های

PVOH تقویت شده با NC نیز برای استحکام کششی و تجزیه و تحلیل حرارتی - وزنی (TGA)^{۱۷} اندازه‌گیری شد. استحکام کششی^{۱۸} (TS) فیلم PVOH خالص ۴۹ MPa مگاپاسکال^{۱۹} بود. استحکام کششی فیلم‌های PVOH تقویت شده با NC پس از هیدرولیز با ۱/۵ M HBr دارای بالاترین مقدار (۷۳ MPa) در حالت استفاده به میزان ۱٪ وزنی بود. این مقدار ۴۹٪ بیشتر از فیلم PVOH خالص بود. با این حال، در حالت استفاده از NC به میزان ۳ و ۵٪ وزنی به داخل ماتریس PVOH، به تدریج مقادیر TS کاهش یافت. استحکام کششی فیلم‌های PVOH با ۳ و ۵٪ وزنی NC به ترتیب به میزان ۳ و ۵۵/۳٪ در مقایسه با استحکام کششی فیلم‌های با ۱٪ وزنی NC کمتر بود.

علاوه بر این، TGA فیلم‌های PVOH تقویت شده با NC سه مرحله اصلی کاهش وزن را نشان داد. اولین مرحله در دمای ۸۰-۱۴۰°C به علت تبخیر آب دارای اتصال ضعیف به لحاظ فیزیکی و قوی از نظر شیمیایی بود و کاهش وزن فیلم در این محدوده حدود ۱۰٪ وزنی به دست آمد. مرحله انتقالی دوم در حدود ۳۷۰-۲۳۰°C بود که به علت تخریب ساختاری فیلم‌های کامپوزیت PVOH بوده و کاهش وزن کلی در این محدوده تقریباً ۷۰٪ حاصل شد. مرحله سوم کاهش وزن در بالاتر از ۳۷۰°C به علت شکستن اسکلت^{۲۰} فیلم‌های کامپوزیت PVOH یا تجزیه ماده کربنی اتفاق افتاد. تعدادی از کاربردهای مرتبط با MFC برای تقویت کردن PVOH گزارش شده است. برای مثال، زیمرمان^{۲۱} و همکاران (۲۰۰۴) دیسپرسیونی از MFC جهت استفاده در PVOH را تهیه نمودند و نانوکامپوزیت‌های PVOH تقویت شده با فیبریل^{۲۲} (محتوای فیبریل ۲۰٪ وزنی) را تولید کردند که دارای

- 1- Reinforcing agent
- 2- Petroleum-derived nonbiodegradable polymers
- 3- Polyethylene
- 4- Polypropylene
- 5- Polylactic acid
- 6- Polyvinyl alcohol
- 7- Methylcellulose
- 8- Chitosan
- 9- Lee
- 10- Casting
- 11- Microcrystalline cellulose
- 12- Hydrobromic acid
- 13- Crystallinity
- 14- Degree of polymerization
- 15- Molecular weight
- 16- Amorphous domains

- 17- Thermo-gravimetric analysis
- 18- Tensile strength
- 19- Megapascal
- 20- Backbone
- 21- Zimmermann
- 22- Fibril-reinforced PVOH nanocomposites

شدند^۱، اثر تقویت‌کنندگی ماده پرکننده سلولزی به شدت کاهش یافت. از آنجایی که نشاسته در مقایسه با سلولز دارای خاصیت آبدوستی بیشتری است، در شرایط مرطوب، آب بیشتری را جذب کرده و سپس نرم می‌شود. شبکه سلولزی توسط یک فاز نرم احاطه شده و برهم‌کنش بین ماده پرکننده و ماتریس به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر بهبود خواص مکانیکی نشاسته، افزودن MFC به ماتریس منجر به کاهش جذب آب در حالت تعادل و ضریب انتشار آب شد.

مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از نانوسلولز در ترکیب با سایر مواد، می‌تواند کارایی فیلم‌های تهیه شده برای کاربرد در بسته‌بندی را بهبود بخشد. برای مثال، در یک مطالعه، نانوذرات سلولز توسط هیدرولیز اسیدی تهیه شده و به طور جداگانه با آلئوسین^{۱۱} و لیزوزیم^{۱۲} توسط اتصال‌دهنده عرضی کربودی‌ایمید^{۱۳} کونژوگه^{۱۴} شدند^{۱۵} [۳۲]. سپس، توسط آزمون‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نانوسلولز کونژوگه نشده دارای فعالیت ضد میکروبی کمی بود؛ اما نانوسلولز کونژوگه شده با آلئوسین^{۱۶} (ACNC) و نانوسلولز کونژوگه شده با لیزوزیم^{۱۷} (LCNC) دارای اثرات ضد قارچی و ضد باکتریایی^{۱۸} خوبی بر ضد کاندیدا آلبیکنس^{۱۹}، آسپرژیلوس نایجر^{۲۰}، استافیلوکوکوس اورئوس^{۲۱}، اش‌ریشیا کلی^{۲۲} بود. نویسندگان پیشنهاد کردند که ACNC و LCNC را می‌توان در صنعت به عنوان یک عامل ضد میکروبی^{۲۳} در

YM تا سه برابر بیشتر و TS تا پنج برابر بیشتر در مقایسه با پلیمر مرجع بود [۲۹].

خان^۱ و همکاران (۲۰۱۰C) فیلم بر پایه متیل سلولز (MC) ریخته‌گری شده^۲ از محلول آبی ۱٪ آن را که حاوی ۰/۵٪ روغن نباتی، ۰/۲۵٪ گلیسرول^۳ و ۰/۲۵٪ توئین^۴ ۸۰ بود، تهیه نمودند [۴۸]. مقاومت در برابر سوراخ شدن (PS)^۵، تغییر شکل در برابر سوراخ شدن^۶ (PD)، ضریب ویسکوالاستیسیته^۷ و نفوذپذیری در برابر بخار آب (WVP) به ترتیب برابر با مقادیر ۱۴۷ نیوتن/میلی‌متر، ۳/۴۶ میلی‌متر، ۴۱٪ و ۶/۳۴ g.mm/m².day.kPa (گرم. میلی‌متر/متر مربع. روز. کیلوپاسکال) به دست آمد. محلول آبی NC (۱٪-۰/۱) به فرمولاسیون^۸ بر پایه MC افزوده شد و مشخص گردید که مقادیر PS و WVP به ترتیب تا ۱۱۷ و ۲۶٪ بهبود یافتند. فیلم‌های حاوی ۰/۲۵٪ NC به عنوان فیلم‌های بهینه معرفی شدند. دافرسن و ویگنان^۹ (۲۰۰۰) نانوکامپوزیت‌های بر پایه نشاسته سیب‌زمینی را تهیه کردند که در آن قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری مواد از طریق افزودن MFC حفظ شد. محتوای پرکننده سلولزی و نرم‌کننده گلیسرول به ترتیب بین ۰-۵۰٪ وزنی و ۰-۳۰٪ وزنی متغیر بود [۳۱].

صرف نظر از محتوای نرم‌کننده، MFC به‌طور قابل توجهی باعث تقویت ماتریس نشاسته شد و افزایش در YM به عنوان تابعی از محتوای پرکننده تقریباً به صورت خطی بود.

همچنین، مقدار YM حدود ۷ GPa در ۵۰٪ وزنی محتوای MFC در مقایسه با حدود ۲ GPa برای نمونه‌های تقویت‌نشده (۰٪ MFC) به دست آمد. با این حال، گزارش شد هنگامی که نمونه‌ها در رطوبت نسبی بالا (۷۵٪) مشروط

- 10- Conditioned
- 11- Allicin
- 12- Lysozyme
- 13- Carbodiimide cross-linker
- 14- Conjugated
- 15- Conjugated
- 16- Allicin-conjugated nanocellulose
- 17- Lysozyme-conjugated nanocellulose
- 18- Antifungal and antibacterial effects
- 19- Candida albicans
- 20- Aspergillus niger
- 21- Staphylococcus aureus
- 22- Escherichia coli
- 23- Antimicrobial agent

- 1- Khan
- 2- Casted
- 3- Glycerol
- 4- Tween 80
- 5- Puncture strength
- 6- Puncture deformation
- 7- Viscoelasticity coefficient
- 8- Formulation
- 9- Dufresne and Vignon

بسته‌بندی مواد غذایی، در داخل مواد غذایی و در مواد نساجی^۱ مورد استفاده قرار داد.

تقویت گزیلان‌ها^۲ (یک دسته فرعی از همی سلولزها^۳) با نانوسلولز به عنوان یک روش برای تهیه مواد زیستی جدید جالب توجه است. در این ارتباط در یک پژوهش، گزیلان چوب درخت غان^۴ با سلولز نانوفیبریلی^۵ (NFC) ترکیب شد و فیلم حاصله با و بدون گلیسرول، سوربیتول^۶ یا متوکسی پلی اتیلن گلیکول^۷ (MPEG) به عنوان نرم‌کننده ریخته‌گری شد [۳۳].

مطابق نتایج به دست آمده، مقداری آگلومریزاسیون^۸ در مورد NFC در فیلم‌های کامپوزیت تهیه شده و همچنین، یک ساختار لایه‌ای از نانوسلولز مشاهده شد. محتوای رطوبت تعادلی در فیلم‌های حاوی ماده نرم‌کننده با افزایش محتوای گلیسرول افزایش یافت؛ اما مستقل از نسبت گزیلان به NFC در فیلم‌های فاقد نرم‌کننده^۹ بود. علاوه بر این، آزمون کشش افزایش استحکام کششی با افزایش محتوای NFC در مورد ترکیبی از نسبت گزیلان به NFC در محدوده ۵۰:۵۰ تا ۸۰:۲۰ را نشان داد. همچنین، به طور کلی افزودن نرم‌کننده میزان شکنندگی فیلم را کاهش داد. مقادیر نفوذپذیری در برابر اکسیژن برای فیلم‌های گزیلان-NFC حاوی نرم‌کننده نیز مشابه با مقادیر به دست آمده برای فیلم‌های NFC خالص بود. علاوه بر این، مقادیر نفوذپذیری در برابر بخار آب برای فیلم‌های حاوی ۴۰-۱۰٪ سوربیتول به طور معنی‌داری نسبت به فیلم‌های کامپوزیت فاقد نرم‌کننده کاهش یافت.

از طرف دیگر، مطالعات مرتبط با بررسی اثر کاربرد نانوذرات سلولزی در بسته‌بندی مواد غذایی با هدف افزایش زمان ماندگاری مواد غذایی مختلف نیز صورت گرفته است.

برای مثال، در یک پژوهش، فیلم مرکب کیتوزان-نانوسلولز^{۱۰} از کیتوزان با وزن مولکولی ۶۰۰-۸۰۰ کیلو دالتون^{۱۱}، نانوسلولز با قطر ۲۰-۵۰ نانومتر و سطوح مختلف ۳۰، ۶۰ و ۹۰٪ (حجمی/وزنی) گلیسرول تهیه شد [۳۴].

هم‌زدن و تیمار فراصوت^{۱۲} به منظور تسهیل پراکندگی یکنواخت ذرات در ماتریس پلیمر^{۱۳} استفاده شد. در نهایت، این فیلم بر روی سطح گوشت چرخ شده برای ارزیابی عملکرد آن در شرایط واقعی به کار گرفته شد. روش انتشار دیسک آگار^{۱۴} ثابت کرد که نانوکامپوزیت تهیه شده دارای اثرات بازدارندگی^{۱۵} بر ضد باکتری‌های گرم مثبت (استافیلوکوکوس اورئوس)^{۱۶} و گرم منفی (اشرشیا کلی و سالمونلا انتریتیدیس)^{۱۷} از طریق سطح تماس خود بود. همچنین، استفاده از نانوکامپوزیت کیتوزان-نانوسلولز برای گوشت چرخ شده منجر به کاهش جمعیت باکتری‌های اسید لاکتیک^{۱۸} در مقایسه با نمونه‌های بسته‌بندی شده در نایلون^{۱۹} به ترتیب تا ۱/۳ و ۳/۱ سیکل لگاریتمی^{۲۰} در ۳ و ۲۵°C پس از ۶ روز ذخیره‌سازی شد.

۷- ایمنی نانوذرات سلولزی

همه نانوسلولزها از فیبریل‌های سلولزی^{۲۱} با حداقل یکی از ابعاد خارجی در مقیاس نانو (بین ۱ و ۱۰۰ نانومتر) تشکیل شده‌اند؛ اما بسته به روش تولید و خواص آن‌ها، می‌توانند به گروه‌های مختلفی تقسیم شوند [۳۵].

10- Chitosan-nanocellulose biocomposite

11- Kilodalton

12- Sonication

13- Polymer matrix

14- Agar disc diffusion method

15- Inhibitory effects

16- Gram-positive (*S. aureus*)

17- Gram-negative (*E. coli* and *S. enteritidis*)

18- Lactic acid bacteria population

19- Nylon

20- Logarithmic cycles

21- Cellulose fibrils

1- Textile materials

2- Xylans

3- Hemicelluloses

4- Birch wood xylan

5- Nanofibrillated cellulose

6- Sorbitol

7- Methoxypolyethylene glycol

8- Agglomeration

9- Unplasticized films

سلولزی^۷ (CNF) و سلولز بسیار ریز نوع ویسکر^۸ (UFC) در شرایط آزمایشگاهی اندازه گیری شد [۳۶]. هیچ نشانه‌ای از سمیت سلولی یا سیتوتوکسیتی^۹ کوتاه مدت مشاهده نشد. این مسئله از طریق برآورد بالاترین دُز تحمل شده (HTD)^{۱۰} و اندازه گیری تغییر در محتوای پروتئین کل (TPC)^{۱۱} ارزیابی شد. علاوه بر این، اثرات ژنوتوکسیک جزئی در یکی از دو آزمون انجام شده مشاهده شد؛ در حالی که پاسخ آزمون‌های دیگر در این مورد منفی بود.

در یک آزمون تنفس حلقی در داخل بدن^{۱۲} که بر روی موش انجام شد، پی برده شد که CNF یک پاسخ التهابی^{۱۳} ایجاد می‌کند [۳۵]. با این حال، مشخص نگردید که آیا پاسخ التهابی تحت تأثیر خود CNF، آلودگی باکتریایی^{۱۴} موجود در CNF یا هر دو قرار گرفت یا خیر. بنابراین، مطالعات بیشتری باید برای حل این مشکل انجام شود.

در یک پژوهش دیگر، آزمون سمیت سلولی برای دو ساختار بر پایه نانوفیبریل طبیعی^{۱۵} شامل ساختارهای نازک و متراکم و همچنین، باز و متخلخل مورد استفاده قرار گرفت [۳۹]. هیچ‌گونه اثرات سمیت حاد ناشی از ساختار^{۱۶} در مورد سلول‌های فیبروبلاست^{۱۷} 3T3 مشاهده نشد. این مسئله توسط میزان تغییرات انجام گرفته در غشای سلولی، فعالیت میتوکندری^{۱۸} سلول و تکثیر DNA از طریق آزمون‌های تماس مستقیم و غیرمستقیم ارزیابی شد.

در یک مطالعه دیگر، سازگاری سلول برای CMF اصلاح نشده، کاتیونی و آنیونی شده^{۱۹} با استفاده از آزمون‌های سلولی مستقیم و غیرمستقیم با

یکی از گروه‌های اصلی نانوسلولزها، سلولزهای فیبریلی^۱ هستند که عمدتاً توسط تیمارهای مکانیکی تولید می‌شوند. آن‌ها مواد پلی‌دیسپرس^۲ با توزیع اندازه ذرات گسترده و ابعاد خارجی عمدتاً خارج از مقیاس نانو می‌باشند. با این حال، سلولز فیبریلی حاوی برخی از مواد در اندازه نانو نیز است که باعث ارائه خواص ویژه برای آن‌ها مانند مساحت سطحی ویژه و واکنش‌پذیری بالا می‌شود. این خواص برای کاربردهای بالقوه سلولز فیبریلی مهم بوده و برای ایمنی آن‌ها نیز بسیار حائز اهمیت هستند [۳۵].

ایمنی نانومواد وابسته به بسیاری از عوامل است که هنوز هم درک کافی در ارتباط با عوامل مؤثر بر برهم‌کنش‌های نانومواد با سلول‌ها و موجودات زنده وجود ندارد. همچنین، ایمنی این مواد وابسته به مسیر قرار گرفتن در معرض آن‌ها است که می‌تواند از راه تنفس یا از طریق دستگاه گوارش (ناحیه معده- روده‌ای)^۳، پوست یا چشم باشد [۳۵].

نتایجی که تا کنون در منابع علمی در ارتباط با خواص سمی بودن نانومواد سلولزی بر پایه چوب [۳۶ و ۳۷] و نانومواد سلولزی تولید شده توسط باکتری [۳۸] منتشر شده‌اند، نشان داده‌اند که این مواد برای انسان یا محیط زیست سمی نیستند. نتایج علمی که اخیراً در ارتباط با سازگاری زیستی^۴ نانومواد بر پایه چوب منتشر شده‌اند نیز این نظر را تأیید می‌کنند [۳۹ و ۴۰]. با این حال، به علت وجود تنوع زیاد در مورد خواص نانومواد سلولزی، این نتایج برای آزمون سمیت^۵ تنها برای مواد مورد آزمون معتبر هستند و نانومواد سلولزی تولید شده باید هر کدام به‌طور جداگانه مورد آزمایش قرار گیرند. بنابراین، توصیف ساختار و خواص مواد مورد مطالعه و همچنین، روش‌های آزمایش مورد استفاده همراه با ذکر جزئیات بسیار مهم هستند [۳۵].

در یک مطالعه خواص سیتوتوکسیک و ژنوتوکسیک^۶ مربوط به دو نوع نانوسلولز مختلف شامل نانوفیبریل‌های

- 7- Cellulose nanofibrils
- 8- Whisker-type ultrafine cellulose
- 9- Cytotoxicity
- 10- The highest tolerated dose
- 11- Total protein content
- 12- In vivo pharyngeal aspiration test
- 13- Inflammatory response
- 14- Bacterial contamination
- 15- Native nanofibril-based structures
- 16- Structure induced acute cytotoxic effects
- 17- Fibroblast cells
- 18- Mitochondrial activity
- 19- Cytocompatibility of unmodified, cationized and anionized (CMF)

- 1- Fibrillated celluloses
- 2- Polydisperse
- 3- Gastro-intestinal tract
- 4- Biocompatibility
- 5- Toxicity test
- 6- Cytotoxic and genotoxic properties

فیبروبلاست^۱‌های پوست انسان بررسی گردید [۴۰]. در این پژوهش نیز علی‌رغم انجام تیمارهای شیمیایی^۲ در مورد CMF، هیچ‌گونه اثرات سیتوتوکسیک (مرتبط با سمیت سلول)^۳ گزارش نشد.

به‌طور کلی، مطالعات مرتبط با قرار گرفتن مصرف‌کننده در معرض نانوسلولز بسیار کم بوده یا وجود ندارد که احتمالاً به دلیل کمبود محصولاتی است که حاوی مواد سلولزی در ابعاد نانو باشند [۳۵]. وارتیانن^۴ و همکاران (۲۰۱۱) فرض کردند که استنشاق^۵ محتمل‌ترین مسیر نانوذرات برای ورود به بدن انسان حین کار است [۳۷]. در یک مطالعه دیگر، به منظور به دست آوردن نتایج قابل اعتماد در مورد ایمنی ریزترین نانوفیبریل‌های سلولزی، CNFs با اندازه بسیار ریز با استفاده از یک دستگاه مکانیکی و به کمک غربال کردن و غشاهای تهیه شدند [۴۱]. ایمنی این نوع CNFs با استفاده از زیست‌سنجی در شرایط آزمایشگاهی^۶، مطالعه سمیت سلولی فوری^۷ و اثرات پایین‌تر از حد کشندگی^۸ بر روی سلول‌های انسانی کشت شده^۹ و توانایی آنها برای آسیب زدن به DNA ارزیابی شد. علائم ضعیفی از سمیت برای ریزترین ذرات مشاهده گردید که نشانه‌ای از تغییرات مورفولوژیکی ناپایا (گذرا)^{۱۰} در سلول‌های (HeLa229) سرطان دهانه رحم انسان^{۱۱} را در بالاترین دُز تحمل شده (HTD) نشان می‌دهد. با این حال، این نمونه‌ها بسیار تحت تیمار قرار گرفتند؛ به‌طوری که پس از ریز کردن بسیار غلیظ شدند. علاوه بر این، آنها حاوی میکروارگانیسم‌های مشاهده شده به شکل رشد میکروبی روی کشت‌های سلولی طی آزمایش‌های سمیت بودند.

- 1- Fibroblasts
- 2- Chemical treatments
- 3- Cytotoxic effects
- 4- Vartiainen
- 5- Inhalation
- 6- In vitro bioassays
- 7- Immediate cytotoxicity
- 8- Sub-lethal effects
- 9- Cultured human cells
- 10- Transient morphological changes
- 11- Human cervix carcinoma (HeLa229) cells

بنابراین، دلیل واقعی برای تغییرات مورفولوژیکی نامشخص باقی ماند. بنابراین، در مجموع باید اظهار نمود که مطالعات بیشتری باید در مورد ایمنی کاربرد نانوذرات سلولزی انجام گیرد.

۸- نتیجه گیری

در حال حاضر، تقریباً تمام پلیمرهای زیست‌تخریب‌ناپذیری که به‌طور گسترده در بخش‌های مختلف استفاده می‌شوند، از محصولات پتروشیمی تولید می‌گردند. با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی در سرتاسر جهان و افزایش مشکل در مدیریت پسماند جامد، مواد پلیمری زیست‌تخریب‌پذیر و نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند در میان گزینه‌های مناسب برای کاربردهای مختلف باشند. کامپوزیت‌های بر پایه NC، به علت داشتن خواص مکانیکی و ممانعت‌کنندگی بسیار خوب و نقش آنها به عنوان حامل مواد فعال زیستی، دارای پتانسیل بسیار زیادی جهت کاربرد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشند. صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، نشان‌دهنده یک زمینه امیدوارکننده و بسیار مورد توجه برای استفاده از فناوری نانو است. استفاده از فناوری نانو در بسته‌بندی مواد غذایی نه تنها می‌تواند خواص مکانیکی و ممانعت‌کنندگی فیلم‌ها را بهبود دهد، بلکه همچنین می‌تواند ایمنی و دوره ماندگاری محصولات غذایی بسته‌بندی شده را از طریق فراهم ساختن شرایط برای رهایش کنترل شده ترکیبات آنتی‌اکسیدان و ضد میکروبی افزایش دهد. بنابراین، امید است که انجام پژوهش‌های بیشتر طی سال‌های آتی، منجر به رفع نواقص ذکر شده تا حد ممکن، بهبود هر چه بیشتر خصوصیات فیلم تهیه شده و در نهایت، کاربرد صنعتی این فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر، به ویژه کامپوزیت‌های بر پایه NC در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی گردد.

11. Beck-Candanedo, S., Roman, M., Gray, D. G., 2005. "Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions". *Biomacromolecules*, 6, 1048–1054.

12. Cao, X., Chen, Y., Chang, P. R., Muir, A. D., Falk, G., 2008. "Starch-based nanocomposites reinforced with flax cellulose nanocrystals". *Polymer Letters*, 2, 502–510.

13. Dieter-Klemm, D., Schumann, D., Kramer, F., Hessler, N., Hornung, M., Schmauder, H. P., Marsch, S., 2006. "Nanocelluloses as innovative polymers in research and application". *Advances in polymer science*, 205, 49–96.

14. Rhim, J. W., Hong, S. I., 2006. "Preparation and characterization of chitosan nanocomposite films with antimicrobial activity". *Journal of Agricultural and food chemistry*, 54, 5814–5822.

15. Sorrentino, A., Gorrasi, G., 2007. "Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications". *Trends in food science and technology*, 18, 84–95.

16. Hitzky E. R., Darder, M., Pilar, A., 2005. "Functional biopolymer nanocomposites based on layered solids". *Journal of materials*. 15, 3650–3662.

17. Strawhecker, K. E. and Manias, E., 2000. "Structure and properties of poly (vinyl alcohol)/Na⁺ montmorillonite nanocomposites". *Chemistry of materials*, 12, 2943–2949.

18. Petersen, K., Nielsen, P. V., Bertelsen, G., Lawther, M., Olsen, M. B., Nilsson, N. H. and Mortensen, G., 1999. "Potential of bio-based materials for food packaging". *Trends in Food Science & Technology*, 10, 52–68.

19. Avella, M., Vlioger, J. J. D., Errico, M. E., Fischer, S., Vacca, P., Volpe, M. G., 2005. "Biodegradable starch/clay nanocomposite films for food packaging applications". *Food chemistry*, 93, 467–474.

1. Khan, A., Huq, T., Khan, R. A., Riedl, B., Lacroix, M., 2014. "Nanocellulose-based composites and bioactive agents for food packaging", *Critical reviews in food science and nutrition*, 54, 163-174.

2. Han, J. H., 2005. "Innovations in food packaging" (2nd ed.), San Diego, CA: Academic Press.

3. Villanueva, M. P., Cabedo, L., Feijoo, J. L., Lagaron, J. M., Gimenez, E., 2006. "Optimization of biodegradable nanocomposites based on a PLA/PCL blends for food packaging applications". *Macromolecular Symposia*, 233, 191–197.

4. Chandra, R., Rustgi, R., 1998. "Biodegradable polymers". *Progress in polymer science*, 23, 1273–1335.

5. Siro, I., Plackett, D., 2010. "Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: A review". *Cellulose*, 17, 459–494.

6. Khan, A., Huq, T., Saha, M., Khan, R. A., Khan, M. A., 2010a. "Surface modification of calcium alginate fibers with silane and methyl methacrylate monomers". *Journal of reinforced plastics and composites*, 29, 3125–3132.

7. John, M. J., Thomas, S., 2008. "Biofibres and biocomposites". *Carbohydrate polymers*, 71, 343–364.

8. Bledzki, A. K., Gassan, J., 1999. "Composites reinforced with cellulose based fibres". *Progress in Polymer Science*, 24, 221–274.

9. Darder, M., Aranda, P., Ruiz-Hitzky, E., 2007. "Bionanocomposites: A new concept of ecological, bioinspired, and functional hybrid materials". *Advanced materials*, 19, 1309–1319.

10. Soykeabkaew, N., Arimoto, N., Nishino, T., Peijs, T., 2008. "All-cellulose composites by surface selective dissolution of aligned lignocellulosic fibres". *Composites science and technology*, 68, 2201–2207.

- treatment and filler loading". *Fibers and Polymers*, 10(1), 77-82.
29. Zimmermann, T., Pohler, E., Geiger, T., 2004. "Cellulose fibrils for polymer reinforcement". *Advanced engineering materials*, 6, 754-761.
30. Khan, R. A., Salmieri, S., Dussault, D., Calderon, J. U., Kamal, M. R., Safrany, A., Lacroix, M., 2010c. "Production and properties of nanocellulose reinforced methylcellulose-based biodegradable films". *Journal of agricultural and food chemistry*, 58, 7878-7885.
31. Dufresne, A., Dupeyre, D., Vignon, M. R., 2000. "Cellulose microfibrils from potato tuber cells: Processing and characterization of starch-cellulose microfibril composites". *Journal of applied polymer science*, 76, 2080-2092.
32. Jebali, A., Hekmatimoghaddam, S., Behzadi, A., Rezapour, I., Mohammadi, B., Jasemizad, T., Yasini, S., Javadzadeh, M., Amiri, A., Soltani, M., Rezaei, Z., Sedighi, N., Seyfi, M., Rezaei, M., and Sayadi, M., 2013. "Antimicrobial activity of nanocellulose conjugated with allicin and lysozyme". *Cellulose*, 20, 2897-2907.
33. Hansen, N. L., Blomfeldt, T. J., Hedenqvist, M., and Plackett, D., 2012. "Properties of plasticized composite films prepared from nanofibrillated cellulose and birch wood xylan". *Cellulose*, 19, 2015-2031.
34. Dehnad, D., Mirzaei, H., Emam-Djomeh, Z., Jafari, S.-M., and Dadashi, S., 2014. "Thermal and antimicrobial properties of chitosan-nanocellulose films for extending shelf life of ground meat". *Carbohydrate Polymers*, 109, 148-154.
35. Pitkänen, M., Kangas, H., Laitinen, O., Sneek, A., Lahtinen, P., Peresin, M., and Niinimäki, J., 2014. "Characteristics and safety of
20. Ozdemir, M., Floros, J. D., 2004. "Active food packaging technologies". *Critical reviews in food science*, 44, 185-193.
21. Masa, S., Alloin, F., Dufresne, A., 2005. "Review of recent research into cellulosic whisker, their properties and their application in nanocomposite filed". *Biomacromolecules*, 6, 612-626.
22. Klemm, D., Philipp, B., Heinze, T., Heinze, U. and Wagenknecht, W., 1998. "Comprehensive cellulose chemistry: Functionalization of cellulose", Vol. 2, Ch. 4, Systematics of cellulose derivatization, p. 29. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany.
23. Tischer, P. C. S. F., Sierakowski, M. R., Westfahl, H. Jr., Cesar Augusto Tischer, C. A., 2011. "Nanostructural reorganization of bacterial cellulose by ultrasonic treatment". *Biomacromolecules*, 11, 1217-1224.
24. Turbak, A. F., Snyder, F. W. and Sandberg, K. R., 1983. "Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential". *Journal of applied polymer science. Applied polymer symposium*, 37, 815-827.
25. Kumar, V., 2002. "Powdered/microfibrillated cellulose", WO Pat. 2002022172.
26. Klemm, D., Schumann, D., Kramer, F., Heßler, N., Hornung, M., Schmauder, H-P., and Marsch, S., 2006. "Nanocelluloses as Innovative Polymers in Research and Application". In: D. Klemm (Ed.), *Polysaccharides II*, vol. 205 (pp. 49-96): Springer Berlin Heidelberg.
27. Nakagaito, A. N., Yano, H., 2004. "The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites". *Applied physics A*, 78, 547-552.
28. Lee, S.-Y., Mohan, D. J., Kang, I.-A., Doh, G.-H., Lee, S., Han, S. O., 2009. "Nanocellulose reinforced PVA composite films: effects of acid

- nano-sized cellulose fibrils". *Cellulose*, 21, 3871-3886.
36. Pitkanen, M., Sneck, A., Hentze, H-P., Sievanen, J., Hiltunen, J., Hellen, E., Honkalampi, U., and von Wright, A., 2010. "Nanofibrillar cellulose-Assessment of cytotoxic and genotoxic properties in vitro". In: Tappi International conference on nanotechnology for the forest products industry. Sept 27-29, 2010, Espoo, Finland.
37. Vartiainen, J., Pohler, T., Sirola, K., Pylkkanen, L., Alenius, H., Hokkinen, J., Tapper, U., Lahtinen, P., Kapanen, A., Putkisto, K., Hiekkataipale, P., Eronen, P., Ruokolainen, J., and Laukkanen, A., 2011. "Health and environmental safety aspects of friction grinding and spray drying of microfibrillated cellulose". *Cellulose* 18, 775-786.
38. Moreira, S., Silva, NB., Almeida-Lima, J., Rocha, HAO., Medeiros, SRB., Alves, C., and Cama, FM., 2009. "BC nanofibers: in vitro study of genotoxicity and cell proliferation". *Toxicology Letters*, 189, 235-241.
39. Alexandrescu, L., Syverud, K., Gatti, A., Chinga Carrasco, G., 2013. "Cytotoxicity test of cellulose nanofibril-based structures". *Cellulose*, 20, 1765-1775.
40. Hua, K., Carlsson, D.O., Alander, E., Linstrom, T., Stromme, M., Mihranyan, A., and Ferraz, N., 2014. "Translational study between structure and biological response of nanocellulose from wood and green algae". *RSC Advances*, 4, 2892-2903.
41. Forestcluster, Ltd., 2011. "Intelligent and resource-efficient production technologies". Eff Tech programme. Programme report 2008-2010, pp 119-120.

آدرس نویسنده

آذربایجان شرقی، تبریز، بلوار ۲۹ بهمن،
دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم
و صنایع غذایی.